OS – Chapitre P

Phénoménologie du champ magnétique

I - Description du champ magnétique

Définition : force de Lorentz

Sous l'action d'un champ électromagnétique, une particule chargée est soumise à la force de Lorentz :

$$\vec{F}_L = q\,\vec{E} + q\,\vec{v} \wedge \vec{B}$$

avec $\vec{E}$ champ électrique et $\vec{B}$ champ magnétique.

L'unité du champ magnétique est le tesla (T), une analyse dimensionnelle se basant sur l'expression de la force de Lorentz permet d'établir

$$\dim(\mathrm{B})) = \mathrm{M} \cdot \mathrm{I}^{-1} \cdot \mathrm{T}^{-2} \quad \text{ou} \quad [\mathrm{T}] = \mathrm{kg\,A^{-1}\,s^{-2}}.$$

I.1 - Notion de champ

Définition :

Un champ est une grandeur physique qui peut être décrite/définie/mesurée partout et tout le temps.

Cela signifie que cette grandeur peut être définie en tout point de l'espace et en tout instant. Mathématiquement, cette grandeur dépend de la position M et de l'instant t, il s'agit donc de façon générale d'une fonction de 4 variables (par exemple x, y, z et t en coordonnées cartésiennes).
On parle de champ même si cette définition souffre de quelques exceptions : par exemple on définir le champ gravitationnel général par un astre de masse M_0 situé en O même si la force gravitationnelle est définie en tout point sauf en O.

La grandeur associée au champ peut être scalaire ou vectorielle, on parlera alors de champ scalaire ou vectoriel. Par exemple, la pression et la température atmosphérique sont des champs scalaires tandis que la vitesse du vent, le champ de pesanteur sont des champs vectoriels. Les champs électriques et magnétiques sont donc des champs vectoriels, définis par leur intensité, leur direction et leur sens.

Un champ est uniforme si la grandeur associée est la même en tout point où il est défini : il ne dépend plus de la position mais uniquement du temps. Par exemple $\vec{B}(t)$.
Un champ est stationnaire si la grandeur associée est la même en tout instant : il ne dépend plus du temps du temps mais uniquement de la position. Par exemple $\vec{B}(M)$ ou $\vec{B}(x, y, z)$.

I.2 - Sources du champ magnétique

Les origines d'un champ magnétiques peuvent être soit macroscopique soit microscopique.

Origine macroscopique

Une charge électrique qui se déplace génère un champ magnétique. Cela implique donc qu'un courant électrique est une source macroscopique du champ magnétique. La relation reliant une distribution de courant au champ magnétique généré est donnée par la loi de Biot et Savart. Deux configurations simples sont fréquemment rencontrées :

Modèle du fil infini L'intensité du champ créé par un fil rectiligne infini parcouru par un courant d'intensité I, à une distance d du fil est :

$$\boxed{||\vec{B}|| = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}}$$

Modèle du solénoïde infini L'intensité du champ créé à l'intérieur d'une bobine longue ($\ell \gg D$) ayant n spires par unité de longueur et parcourue par un courant d'intensité I :

$$\boxed{||\vec{B}|| = \mu_0 n I}$$

L'intensité çà l'extérieur de la bobine est nulle
avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\mathrm{T\,A^{-1}\,m}$ la perméabilité magnétique du vide. On écrit aussi $\frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{T\,A^{-1}\,m}$.
On retiendra que l'intensité du champ $||\vec{B}||$ est proportionnelle à l'intensité du courant I.

Origine microscopique

La matière aimantée est source de champ magnétique. Un aimant est toujours constitué d'un pôle Nord, où le champ magnétique sort de l'aimant et d'un pôle sud, où le champ magnétique rentre dans l'aimant. Une compréhension complète des mécanismes liant matière et champ magnétique à l'échelle microscopique fait appel à la notion de spin quantique et est largement hors-programme.

Ordres de grandeur de champs magnétiques usuels

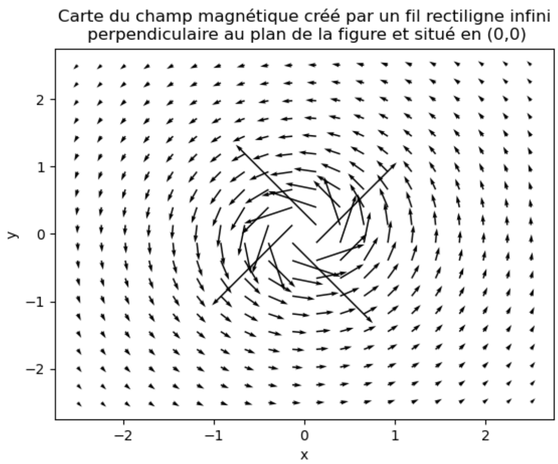
Source du champ	Intensité du champ ($\vert\vert\vec{B}\vert\vert$)
Terre	$50\,\mathrm{\mu T}$
Fil ($I = 1\,\mathrm{A}$, $d = 1\,\mathrm{m}$))	$2 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{T}$
Bobine longue ($I = 1\,\mathrm{A}$, 1000 spires/m)	$1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{T}$
Aimant permanent (à quelques cm)	de 0,1 à 1 T
Machine IRM	5 T
Bobine supraconductrice	de 50 à 100 T

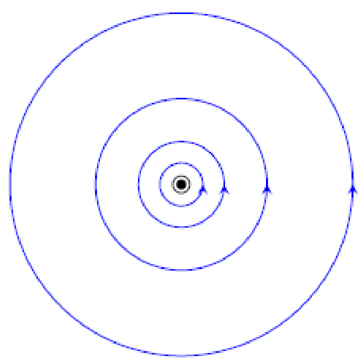
Note : les valeurs du tableau en gras sont à connaître dans le cadre du programme.

I.3 - Cartographie du champ magnétique

Pour représenter le champ magnétique dans l'espace (3D) ou un plan (2D), on réalise des **cartes du champ** : on maille l'espace (ou le plan) de points M_i et on trace les vecteurs $\vec{B}(M_i)$.
On peut également tracer des **lignes de champ** : une ligne de champ est une courbe orientée qui est en tout point tangente (et de même sens) au vecteur $\vec{B}$. En tout point où le champ est défini et non nul, passe une et une seule ligne de champ.

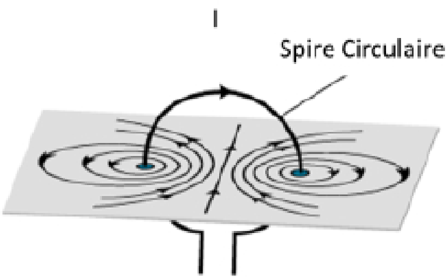
Exemple 1 : Champ généré par un fil rectiligne infini

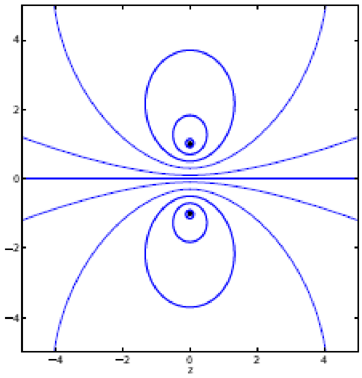




Le fil est vertical, le courant sort du plan de la feuille. Le sens du champ est donné par la règle de la main droite.

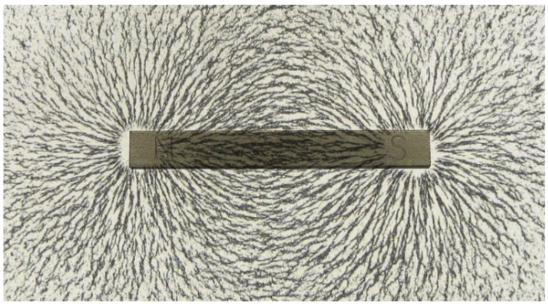
Exemple 2 : Champ généré par une spire circulaire

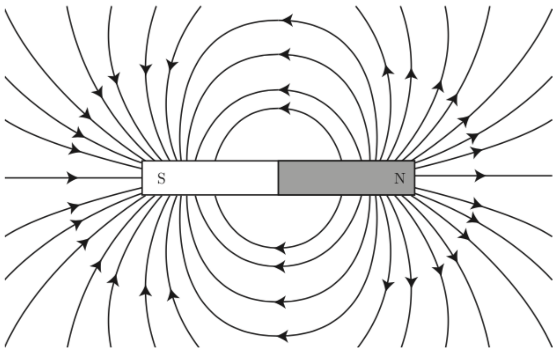




Gauche : vue en trois dimensions. Droite : vue dans le plan méridien, grisé sur la figure de gauche.

Exemple 3 : Champ créé par un aimant droit





Les lignes de champ sortent du pôle nord (N) et convergent vers le pôle sud (S).

Exploitation d'une cartographie du champ magnétique

Il est important de savoir exploiter une cartographie du champ magnétique pour en déduire des informations sur celui-ci. En particulier :

— si les lignes de champs se resserrent, l'intensité du champ augmente,

— si les lignes de champs sont parallèles entre elles, le champ est localement uniforme,

— les lignes de champs sont en général fermées et tournent autour des courants,

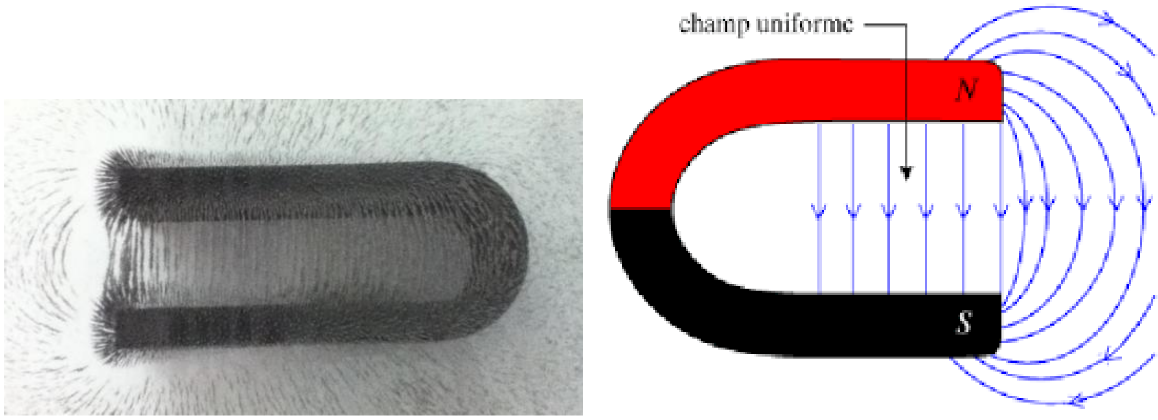
— pour un champ généré par un aimant, les lignes de champs vont du pôle nord vers le pôle sud,

— pour un champ généré par un courant, le sens du champ est donné par la règle de la main droite.

I.4 - Champ quasi-uniforme

Dans de très nombreuses applications, il est souvent utile de générer un champ magnétique qui soit localement uniforme.

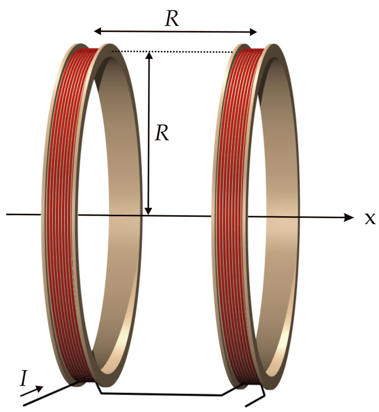
Champ créé par un aimant en U



Dans l'entrefer de l'aimant, le champ est quasi-uniforme.

Exemple des bobines de Helmholtz

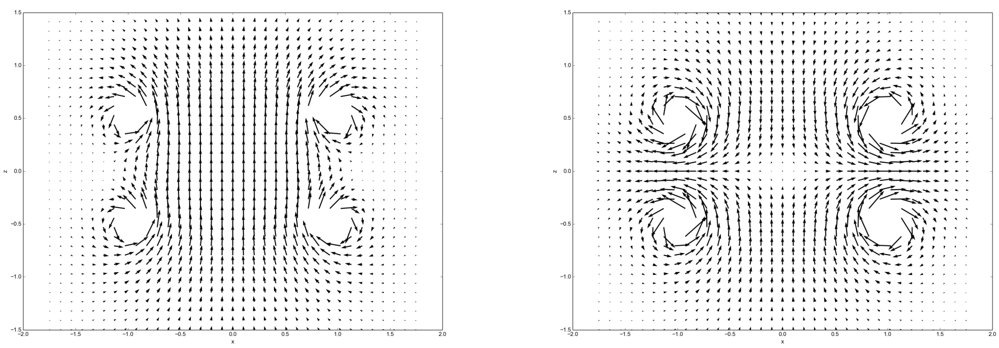
Les « bobines de Helmholtz » est un dispositif constitué par deux enroulements quasiment plans, identiques, souvent circulaires, séparés d'une distance égale à leur rayon, parcourus par un même courant.



Bobines de Helmholtz. Ansgar Hellwig. CC-BY-SA-2.0 and GFDL. Wikimedia Commons.

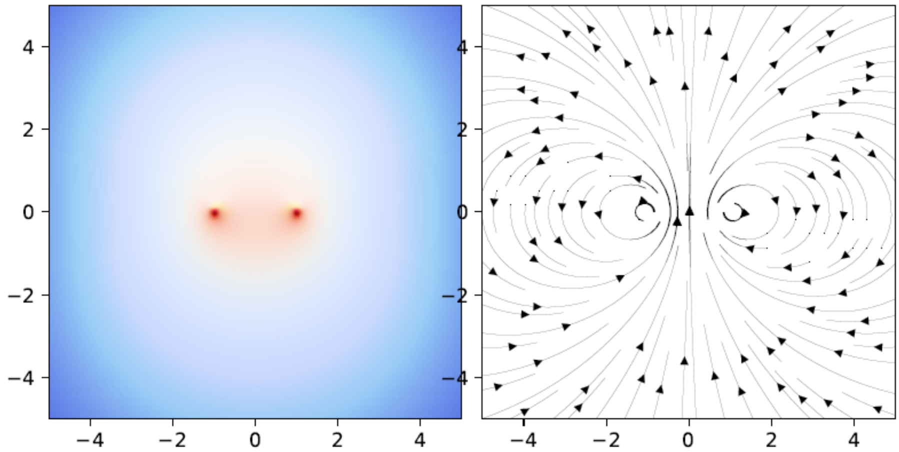
Application :

Sur chacune des cartes de champ suivantes déterminer l'orientation des courants et la disposition des enroulements.

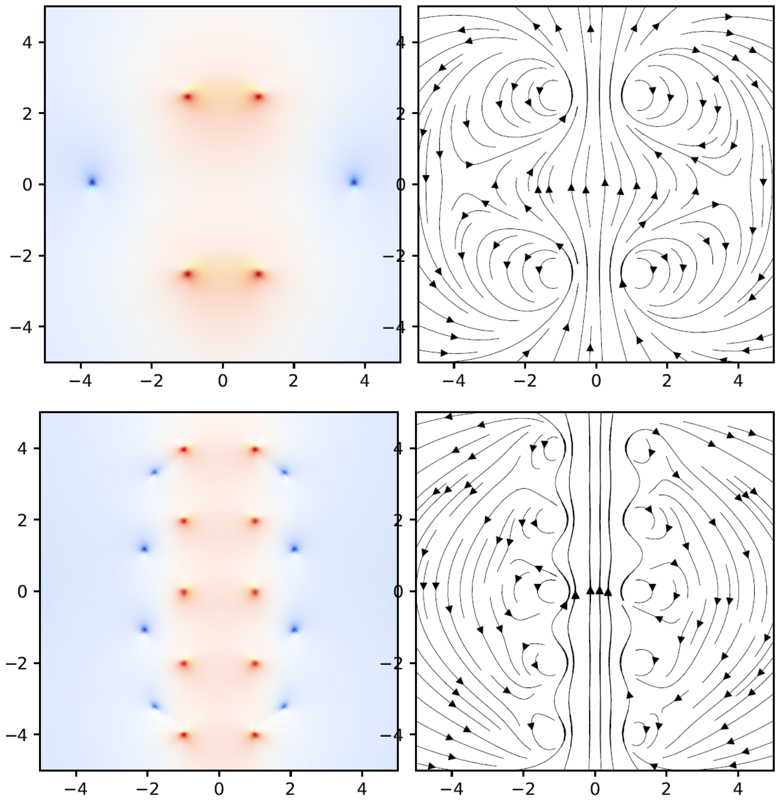


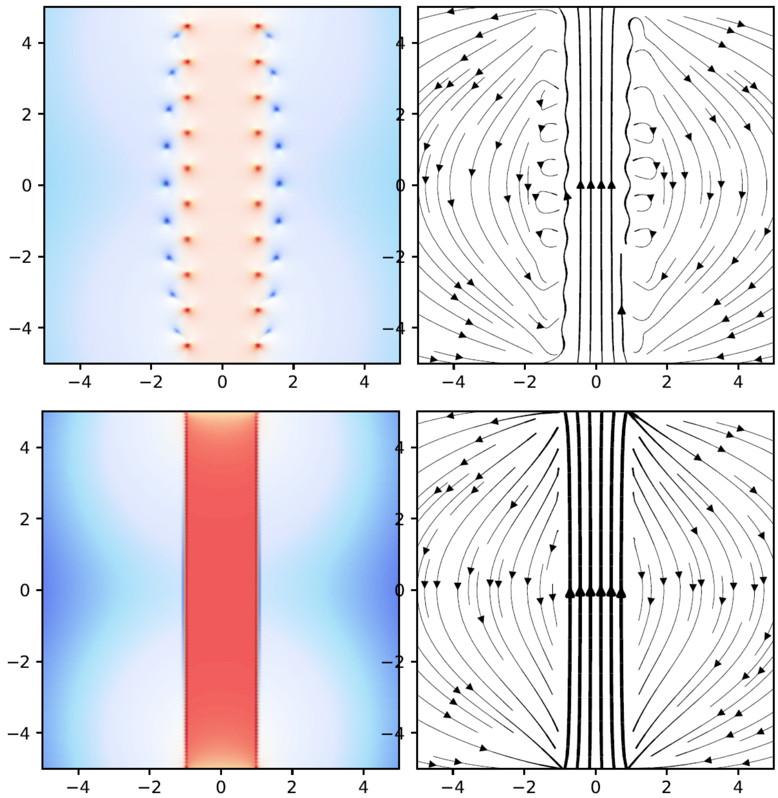
De la spire à la bobine

Une bobine, ou solénoïde est la superposition de spires parallèles, acollées entre elles, parcourues par le même courant.



Visualisation du champ magnétique créé par une spire circulaire dont l'axe est contenu dans le plan de la figure. À gauche : dégradé de couleurs représentant l'intensité du champ (faible=bleu, intense=rouge). À droite lignes de champ.





Nombres de spires équidistantes, de haut en bas et de gauche à droite : 2, 5, 10 et 100.

I.5 - Symétries et invariances

Pour simplifier la détermination du cahmp magnétique généré par un courant, on utilise si possible des propriétés d'invariance ou de symétrie de celui-ci.

Définition : Plan de symétrie/antisymétrie

Un plan Π (respectivement Π') est un plan de symétrie (resp. d'antisymétrie) du système étudié si à tout courant correspond un courant identique (resp. opposé), symétrique par rapport à Π (resp. Π').

Propriété : Invariance

Si la source du champ est invariante par une transformation géométrique, le champ l'est également.

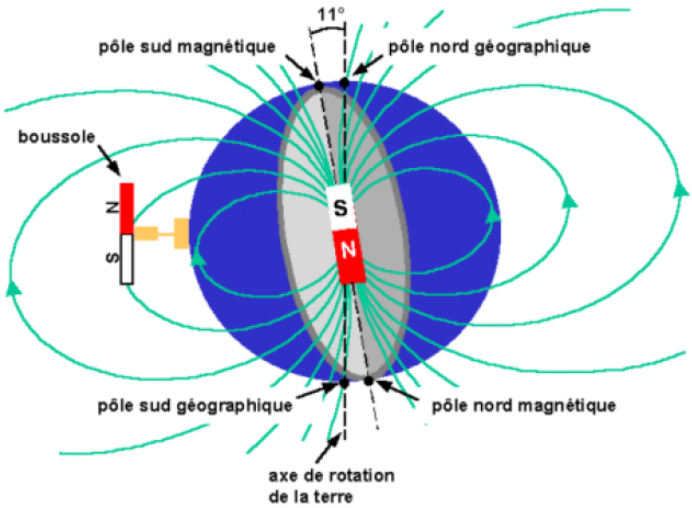
Propriété : Symétries

- En tout point d'un plan de symétrie des courants, le champ est perpendiculaire à ce plan.
  Exemples :
  - fil rectiligne (plan perpendiculaire au fil)
  - spire/bobine (plan contenant l'axe de la spire/bobine)
- En tout point d'un plan d'antisymétrie des courants, le champ appartient à ce plan.
  Exemples :
  - fil rectiligne (plan du fil)
  - spire (plan de la spire)

I.6 - Moment magnétique

Dipôle magnétique

Un dipôle est un dispositif générant un champ magnétique $\vec{B}$. Certaines lignes de champ traversent le dipôle : les lignes sortent par le pôle Nord et rentrent par le pôle Sud.
On donne ci-dessous le champ magnétique créé par la Terre :



Boussole et champ magnétique terrestre. Compte tenu du champ créé par la Terre, le pôle nord d'une boussole pointe vers le pôle sud magnétique de la Terre, c'est pourquoi les pôles géographiques et magnétiques sont inversés. Les pôles géographiques sont définis par rapport à l'axe de rotation de la Terre, ce qui explique le petit décalage supplémentaire de 11°.

Ordres de grandeur

— Aimant droit usuel : $1\,\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}^2$
— Aimant puissant : $10\,\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}^2$
— Terre : $8\cdot 10^{22}\,\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}^2$

II - Action d'un champ magnétique

II.5 - Effet moteur d'un champ tournant

Principe du moteur synchrone

Lorsqu'un système quelconque possédant un moment magnétique est plongé dans un champ magnétique, l'effet des forces d'origine magnétique subies par le système tend à aligner le vecteur-moment avec le vecteur-champ. Si on conçoit un dispositif à l'intérieur duquel la direction du vecteur champ magnétique tourne, il est possible de mettre en rotation le système et donc d'envisager un moteur magnétique.

Réalisation d'un champ tournant

Idée initiale

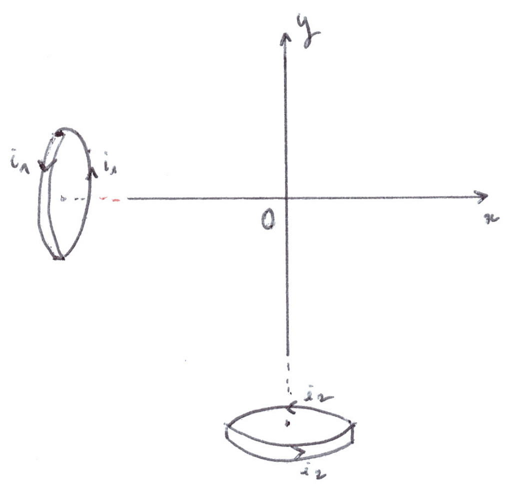
On peut, par exemple :

- créer un champ magnétique à l'aide d'une bobine ;
- placer un aimant permanent (=possédant un moment magnétique propre) à proximité ;
- faire tourner l'axe de la bobine, ce qui modifie la direction du champ magnétique et fait tourner l'aimant.

Cette idée n'est pas forcément ce qui est recherché parce que, pour faire tourner la bobine, qui est un objet matériel, il faut un moteur. On aurait donc besoin d'un premier moteur pour faire fonctionner un second moteur.

Dispositif à bobines déphasées

Principe On place deux bobines longues d'axes perpendiculaires. On note O l'intersection des deux axes et on choisit O à égales distances des deux bobines. Soient i_1 et i_2 les courants parcourant les deux bobines 1 et 2.



En O, le champ total est la somme des créés par chacune des deux bobines :

$$\forall t,\ \overrightarrow{B}(O,t) = \overrightarrow{B}_1(O,t) + \overrightarrow{B}_2(O,t)$$

En un point de l'axe d'une bobine, le champ est colinéaire à cet axe. D'autre part, on a vu que le champ magnétique créé par un dispositif parcouru par un courant électrique est proportionnel à l'intensité du courant [1]. Notons K_j le coefficient de proportionnalité pour la bobine j. On a, en O :

$$\overrightarrow{B}_1(O,t) = K_1(O)\, i_1(t)\, \vec{e}_x \quad \text{et} \quad \overrightarrow{B}_2(O,t) = K_2(O)\, i_2(t)\, \vec{e}_y$$

ou, si les deux bobines sont identiques

1. Par exemple, pour une bobine longue, le champ créé sur son axe est proportionnel à $\mu_0 n$ où n et le nombre de spires par unité de longueur.

$$\overrightarrow{B}_1(O,t) = K(O)\, i_1(t)\, \vec{e}_x \quad \text{et} \quad \overrightarrow{B}_2(O,t) = K(O)\, i_2(t)\, \vec{e}_y$$

Pour obtenir un vecteur-champ magnétique total dont la direction tourne au cours du temps, il suffit d'alimenter les bobines avec des courants électriques synchrones (c'est-à-dire de même pulsation) et décalés temporellement (c'est-à-dire déphasés).

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \forall t,\ i_1(t) & = & i_{1m}\cos(\omega t + \varphi_1) \\ \forall t,\ i_2(t) & = & i_{2m}\cos(\omega t + \varphi_2) \end{array} \right.$$

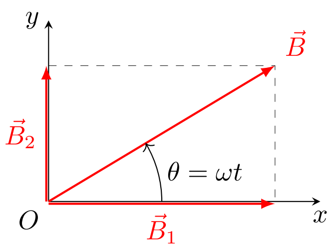
Dans ce cas, l'extrémité du vecteur-champ magnétique total décrit une ellipse [2] dans le plan (xOy).
Si on choisit des amplitudes identiques ($i_{1m} = i_{2m} = i_m$) et des bobines en quadrature de phase (par exemple $\varphi_1 = 0$ et $\varphi_2 = -\frac{\pi}{2}$) alors on obtient :

$$\forall t,\ \overrightarrow{B}(O,t) = K(O)\, i_m\, (\cos(\omega t)\vec{e}_x + \sin(\omega t)\vec{e}_y)$$

Les composantes du vecteur-champ magnétique sont obtenues en projetant en projetant sur les axes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{e}_x\ :\ \forall t,\ B_x(O,t) = K(O)\, i_m\cos(\omega t) \\ \vec{e}_y\ :\ \forall t,\ B_y(O,t) = K(O)\, i_m\sin(\omega t) \end{array} \right.$$

On reconnaît les équations paramétriques d'un cercle : l'extrémité du vecteur-champ magnétique total décrit un cercle de rayon Ki_m à la vitesse angulaire ω dans le plan (xOy).



Il suffit alors de placer un aimant permanent en O et la direction de son moment magnétique suivra celle du champ magnétique, à la même vitesse angulaire : c'est le principe du moteur synchrone.

Réalisation pratique Pour des raisons pratiques (puissances moyennes plus élevées notamment), on préfère souvent réaliser le champ magnétique tournant avec trois bobines équi-réparties sur un cercle et déphasées les unes des autres de $\frac{2\pi}{3}$. C'est le principe des moteurs synchrones triphasés.

2. Relire par exemple la notice de travaux pratiques sur les déphasages et notamment la méthode de l'ellipse.